

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Výpočet účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou
dle ČSN 07 0305

Calculation of Steam Boiler Efficiency according to ČSN 07 0305

Student:

Keresztes Pavel

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Stáňa, PhD.

Kopie zadání bakalářské práce

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Pavel Keresztes

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma:

Výpočet účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou
dle ČSN 07 0305
Calculation of Steam Boiler Efficiency according to ČSN 07 0305

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte energetickou bilanci kotle.
2. Popište výpočet a vliv dílčích ztrát na celkovou účinnost kotle bez použití aditivního odsíření.
3. Popište výpočet a vliv dílčích ztrát na celkovou účinnost kotle při použití aditivního odsíření.
4. Srovnajte výsledky s výpočtem dle ČSN 07 0302.

Seznam doporučené odborné literatury:

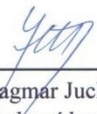
ČSN 07 0302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
ČSN 07 0305. *Hodnocení kotlových ztrát*. Praha: Český normalizační institut, 1983.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Stáňa, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

21. 5. 2012

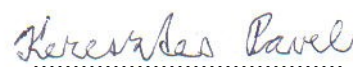
Handwritten signature of Kereš Pavel in blue ink, written over a dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21. 5. 2012



plné jméno autora práce

Adresa trvalého pobytu autora práce: Tylova 4/2779, Ostrava-Zábřeh, 700 30

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KERESZTES, P. Výpočet účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou dle ČSN 07 0305 : bakalářská práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 43 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem účinnosti fluidního kotle nepřímou metodou dle ČSN 07 0305. Bakalářská práce se skládá z rešeršní a výpočetní části. Rešerše je zaměřená na popis fluidního kotle, popis tepelné bilance kotle, na rozdíl mezi přímou a nepřímou metodou stanovení účinnosti, na tepelné ztráty kotle a vztahy pro jejich výpočet.

Ve výpočtové části jsou provedeny výpočty stechiometrie spalování, měrné tepelné kapacity spalin, účinnosti fluidního kotle bez odsíření a s odsířením. Na závěr jsou porovnány výsledky s normou ČSN 07 0302.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KERESZTES, P. Calculation of Steam Boiler Efficiency according to ČSN 07 0305 : Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2012, 43 s. Thesis head: Stáňa, M.

This Bachelor Thesis deals with the calculation of steam boiler efficiency according to ČSN 07 0305. The Bachelor Thesis consists of theoretical and calculated parts. Theoretical part is focused on the description of fluidized steam boiler, a description of the boiler heat balance, the difference between direct and indirect method of assessing the efficiency, heat losses of steam boiler and formulas for their calculation.

In the calculated part are performed calculations of the stoichiometry, heat capacity of combustion gases, efficiency of fluidized steam boiler with and without desulphurisation.

In conclusion, the results are compared with the standard ČSN 07 0302.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
0 Úvod	11
1 Fluidní kotel	12
2 ENERGETICKÁ BILANCE	13
3 STECHIOMETRIE SPALOVÁNÍ	15
4 STANOVENÍ ÚČINNOSTI KOTLE	17
4.1 Přímé určení účinnosti	17
4.2 Nepřímé určení účinnosti	18
4.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:	19
4.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách	21
4.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování	21
4.2.4 Ztráta citelným teplem spalín	23
4.2.5 Ztráta sdílením tepla do okolí	24
5 ODSIŘOVÁNÍ SPALIN	25
6 VÝPOČET	26
6.1 Stechiometrie spalování	27
6.2 Měrná tepelná kapacita spalín	29
6.3 Výpočet účinnosti kotle bez odsíření	30
6.3.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:	30
6.3.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách	31
6.3.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování	31
6.3.4 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)	32
6.3.5 Ztráta sdílením tepla do okolí	32
6.3.6 Stanovení účinnosti fluidního kotle	34
6.4 Výpočet účinnosti kotle s odsířením	34
6.4.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:	37
6.4.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách	37
6.4.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování	38
6.4.4 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)	38
6.4.5 Ztráta sdílením tepla do okolí	39

6.4.6	Stanovení účinnosti roštového kotle	39
7	Porovnání výsledků s normou ČSN 07 0302.....	40
8	Závěr.....	41
9	Seznam použitých pramenů	43
10	Seznam příloh.....	43

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Veličina	Rozměr
A	Obsah popela ve spalovaném palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
C	Obsah uhlíku v palivu, obsah hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
Ca	Vápník	
CaO	Oxid vápenatý	
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý (vápenec)	
Ca(OH) ₂	Hydroxid vápenatý	
CaSO ₄	Síran vápenatý	
CO ₂	Oxid uhličitý	
D	Jmenovitý nebo dílčí výkon kotle	kW, MW
H	Obsah vodíku v palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
H ₂ O	Voda	
L	Délka	mm
N	Obsah dusíku v palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
O	Obsah kyslíku v palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
O	Objem vzduchu nebo spalin	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
O ₂	Kyslík	
Q	Teplo, energie	kJ, MJ
\dot{Q}	Tepelný tok, energetický tok	$\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$, kW, MW
Q_i^r	Výhřevnost paliva	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
S	Obsah síry v palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
SO ₂	Oxid siřičitý	
W	Obsah vody v palivu	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, %
X	Obsah popela v palivu zachyceného v uvažovaném druhu tuhých zbytků, vztažený k obsahu popela v palivu přivedeném do kotelního zařízení	%
a	Základ logaritmu	
c	Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
exp	Exponent	

Značka	Veličina	Rozměr
i	Entalpie	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
k	Součinitel pro výpočet ztráty sdílením tepla do okolí	
ln	Přirozený logaritmus	
log	Logaritmus	
m	Vzdálenost	mm
\dot{m}	Hmotnostní tok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
n_{Ca}	Stechiometrický poměr vápníku	$\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
n_s	Stupeň odsíření	%
p	Tlak	kPa, MPa
q	Teplo přivedené do kotle spálením jednoho kilogramu paliva	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
t	Teplota	$^{\circ}\text{C}$, K
x	Podíl vzduchu ohřívajícího cizím zdrojem z celkového množství spalovacího vzduchu	
Řecká abeceda		
α	Součinitel přebytku vzduchu	
Δ	Rozdíl (teplot, entalpií, tlaků apod.)	
ζ	Relativní tepelná ztráta	%
η	Účinnost	%
μ	Čistota vápence	%
ν	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	
ρ	Hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
φ	Relativní vlhkost	
ω	Objemový podíl složky ve směsi plynů	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Význam použitých indexů		
ad	Aditivní látka	
Ar	Argon	
b	Brýdy	
C	Uhlík, hořlavina v tuhých zbytcích	
CH_4	Metan	
ci	Poměrné ztráty	
CO	Oxid uhelnatý, hořlavina ve spalínách	
CO_2	Oxid uhličitý	
f	Fyzický	
H_2	Vodík	
H_2O	Voda, vodní pára	
ch	Chladicí voda	
i	Složka směsi, uvažovaný druh tuhých zbytků	

Značka	Veličina	Rozměr
j	Jmenovitá hodnota	
k	Koncový, komín	
K	Změna po odsíření	
l	Úlet	
lp	Ložový popel	
min	Minimální, teoretický	
N ₂	Dusík	
O ₂	Kyslík	
od	Odlučováč prášku	
p	Pára	
pal	Palivo, přivedeno palivem	
pop	Popílek	
pr	Přivedený, příkon	
ps	Spaliny suché	
p _v	Spaliny vlhké, sdílení tepla do okolí	
pu	Uhelný prášek	
p _v	Předeřtátí cizím zdrojem	
r	Propad, surové (spalované) palivo	
s	Spaliny, struska, škvára	
SO ₂	Oxid siřičitý	
spal	Spalitelný	
v	Vzduch, voda	
vs	Vzduch suchý	
vv	Vzduch vlhký	
vyr	Vyrobený (výkon)	
zt	Ztráty (média)	

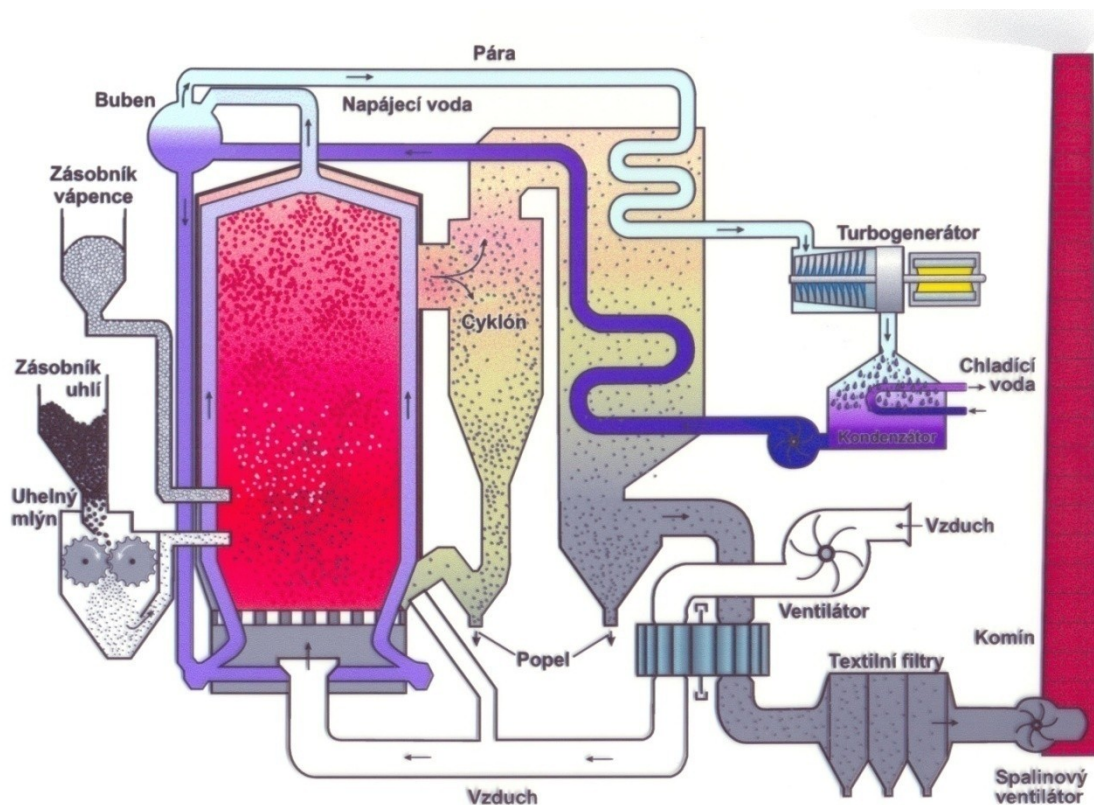
0 Úvod

Cílem této bakalářské práce je provést výpočet účinnosti fluidního kotle nepřímou metodou dle ČSN 07 0305 a výsledky porovnat s normou ČSN 07 0302.

Norma ČSN 07 0305 je určena pro směrné hodnoty k posuzování tepelné bilance a pro stanovení tepelných ztrát parních a horkovodních kotlů. Na rozdíl od normy ČSN 07 0302 se zde neuvažuje s odsiřováním, ani zde není uveden výpočet pro fluidní kotle. Důvodem je, že norma ČSN 07 0305 byla schválena v roce 1983, tj. mnohem dříve než norma ČSN 07 0302.

1 Fluidní kotel

Je zařízení pro spalování širokého spektra paliv. Směs inertního materiálu (ložový popel) a paliva ve fluidním kotli se svými vlastnostmi blíží tekutině. Ve fluidním kotli dochází ke spalování při nízkých teplotách (800-850°C), a tím i ke snížení nežádoucích zplodin, zejména NO_x . [1]



Obr. 1-1 Schéma fluidního kotle s cirkulující vrstvou [2]

Podle pracovního tlaku rozlišujeme:

1. **atmosférické fluidní kotle**-spalování probíhá za přibližně stejného tlaku jako je v okolní atmosféře
2. **přetlakové fluidní kotle**-dochází ke zvyšování tlakových poměrů v ohništi, a tím i ke zvyšování účinnosti spalování

Podle druhu fluidní vrstvy:

1. **se stacionární fluidní vrstvou**-spalování ve vzhledu s rozeznatelnou hladinou vrstvy
2. **s cirkulující fluidní vrstvou**-částice ve vrstvě obíhají přes cyklón zpět do ohniště, dokud nevyhoří

2 ENERGETICKÁ BILANCE

Při výpočtu účinností je nutné stanovit energetickou bilanci parního kotle. Tato metoda vychází ze zákona zachování energie a stanovujeme v ní jednotlivé položky energií na vstupu a výstupu ze soustavy, přičemž musí platit:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Q_i = 0 \quad [\text{kW, kJ}] \quad (2-1)$$

kde Q_i energie, teplo (kJ)

Hranice bilančního prostoru musí být vytčeny tak, aby bylo možné správně a jednoznačně měřit všechny hmotnostní a energetické toky. [3]

Úplná soustava je tvořena:

a) **vlastní parní kotel**, tj. soubor výměníků tepla, v nichž se

- napájecí voda dohřívá a odpařuje, vyrobená pára přehřívá, popřípadě také částečně expandovaná a ochlazená pára znovu přehřívá;
- ohřívá (popřípadě suší) spalované palivo;
- ohřívá spalovací vzduch

zařízení potřebná pro zajištění recirkulace pracovních látek v těchto výměnících (oběhová čerpadla u PK s povzbuzenou cirkulací nebo superponovaným oběhem apod.);

b) **pomocné zařízení**, tj. soubor různých strojních popřípadě také stavebních, chemických či jiných zařízení pro:

- dopravu a úpravu použitých paliv (dopravníky a podavače uhlí, mlýny na uhlí s příslušnými třidiči, odlučovači a ventilátory, čerpadla kapalných paliv apod.);
- dopravu spalovacího vzduchu (vzduchové ventilátory);
- dopravu spalín (spalinové a recirkulační ventilátory);
- dopravu a úpravu tuhých zbytků (drtiče, podavače a dopravníky škváry, strusky a popílku, výměníky tepla pro chlazení tuhých zbytků apod.);
- čištění spalín (odlučovače popílku, odsířovací zařízení, denox apod.).

Při formulaci podmínek záruk a převímacích zkoušek se musí rozlišovat účinnost vlastního parního kotle (tzv. hrubá účinnost) a účinnost úplné soustavy parního kotle s příslušným pomocným zařízením (tzv. čistá účinnost).

Všeobecně je účinnost dána poměrem výkonu, tj. energie dodané vodě a páře v soustavě výměníků tepla tvořících parní kotel k příkonu, tj. energii přivedené do parního kotle v palivu, nebo z cizích zdrojů (tj. zdrojů mimo vlastní parní kotel).

Položky energetické bilance:

- I. Příkon
 - a. teplo chemicky vázané v palivu
 - b. fyzické teplo dodané palivu z cizího zdroje
 - c. fyzické teplo dodané spalovacímu vzduchu z cizího zdroje
 - d. fyzické teplo a jiné energie přivedené mimo spalovací proces a nezbytné k zajištění chodu vlastního parního kotle, včetně tepelného zabarvení chemických reakcí probíhajících současně se spalováním paliva
 - e. fyzické teplo a jiné energie přivedené mimo spalovací proces a nezbytné k zajištění chodu pomocných zařízení
- II. Ztráty
 - a. hořlavinou ve spalínách
 - b. fyzickým teplem spalin (komínová)
 - c. hořlavinou v tuhých zbytcích
 - d. fyzickým teplem tuhých zbytků
 - e. sdílením tepla do okolí
 - f. chlazením
- III. Vstup pracovní látky do parního kotle
 - a. teplo v napájecí vodě
 - b. teplo ve vodě vstřikované do přehřáté páry (není-li obsaženo v napájecí vodě)
 - c. teplo ve vratné páře vstupující do mezipřehříváku
 - d. teplo ve vodě vstřikované do mezipřehříváné páry
- IV. Výstup pracovní látky z parního kotle
 - a. teplo v syté nebo přehřáté páře (popř. horké vodě)
 - b. teplo v mezipřehřáté páře
 - c. teplo odebrané v páře a/nebo vodě pro zajištění chodu vlastního parního kotle a podobné účely
 - d. teplo v odkalu a odluhu

3 STECHIOMETRIE SPALOVÁNÍ

Pro výpočet účinnosti nepřímou metodou je nutné spočítat objem suchých spalín O_{PS} a vlhkých spalín O_{PV} . Tyto hodnoty vypočítáme pomocí stechiometrie. Norma ČSN 07 0305 neobsahuje stechiometrické výpočty, proto tyto vztahy byly převzaty. [4]

Objem spalovacího vzduchu:

$$O_{O_2 min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r + \frac{22,39}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,39}{2 \cdot 2,016} \cdot H^r - \frac{22,39}{32} \cdot O^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-1)$$

$$O_{VS min} = \frac{O_{O_2 min}}{0,2095} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-2)$$

$$O_{VS} = \alpha \cdot O_{VS min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-3)$$

$$O_{VV} = O_{VS} \cdot \nu \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-4)$$

kde $O_{O_2 min}$ stechiometrický objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení

1 kg paliva ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),

C^r obsah uhlíku v surovém vzorku paliva (%),

S^r obsah síry v surovém vzorku paliva (%),

H^r obsah vodíku v surovém vzorku paliva (%),

O^r obsah kyslíku v surovém vzorku paliva (%),

$O_{VS min}$ stechiometrické množství suchého vzduchu teoretického ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),

O_{VS} stechiometrické množství suchého vzduchu skutečného ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),

α součinitel přebytku vzduchu (-),

O_{VV} stechiometrické množství vlhkého vzduchu skutečného ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),

ν součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti (-).

Objem spalín:

$$O_{PS min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-5)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-6)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-7)$$

$$O_{N_2} = O_{N_2,VS} + O_{N_2,PV} = 0,7905 \cdot O_{VS \min} + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-8)$$

$$O_{PS} = O_{PS \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS \min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-9)$$

$$O_{PV} = O_{PS} + O_{H_2O,sk} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-10)$$

$$O_{H_2O,sk} = \frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 2,016} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + \alpha \cdot (\nu - 1) \cdot O_{VS \min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-11)$$

kde $O_{PS \min}$ stechiometrický objem suchých spalin teoretických ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{CO_2} objem CO_2 v suchých spalinách teoretických ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{SO_2} objem SO_2 v suchých spalinách teoretických ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{N_2} objem N_2 v suchých spalinách teoretických ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 $O_{N_2,VS}$ objem N_2 ve vzduchu ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 $O_{N_2,PV}$ objem N_2 ve spalinách ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{PS} stechiometrický objem suchých spalin skutečných ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{PV} stechiometrický objem vlhkých spalin skutečných ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 O_{H_2O} stechiometrický objem vodní páry ve spalinách ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 W^r obsah vody v surovém vzorku paliva (%).

Koncentrace složek ve spalinách:

$$\omega_i = \frac{O_i}{O_{PV}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3-12)$$

kde ω_i koncentrace uvažované složky ve spalinách (%),
 O_i objem uvažované složky ve spalinách ($m_N^3 \cdot kg^{-1}$),
 i uvažovaná složka (možno dosadit CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 a H_2O)

Stanovení součinitele přebytku vzduchu z koncentrace O_2 ve spalinách

$$O_{O_2} = \omega_{O_2} \cdot O_{PS} = 0,2095 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS \min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-13)$$

$$\omega_{O_2} \cdot O_{PS} = 0,2095 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS \min} \quad (3-14)$$

$$\omega_{O_2} \cdot [O_{PS \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS \min}] = 0,2095 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS \min} \quad (3-15)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\omega_{O_2}}{0,2095 - \omega_{O_2}} \cdot \frac{O_{PS \min}}{O_{VS \min}} \quad [-] \quad (3-16)$$

Pro zjednodušený výpočet přebytku vzduchu u tuhých paliv (pouze tuhá!):

$$\alpha = 1 + \frac{\omega_{O_2}}{0,2095 - \omega_{O_2}} \quad [-] \quad (3-17)$$

Stanovení součinitele přebytku vzduchu z koncentrace CO₂ ve spalínách

$$O_{CO_2} = \omega_{CO_2} \cdot O_{PS} = \omega_{CO_2,max} \cdot O_{VSmin} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (3-18)$$

$$\omega_{CO_2} \cdot O_{PS} = \omega_{CO_2,max} \cdot O_{VSmin} \quad (3-19)$$

$$\omega_{CO_2} \cdot [O_{PSmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}] = \omega_{CO_2,max} \cdot O_{PSmin} \quad (3-20)$$

$$\alpha = 1 + \left(\frac{\omega_{CO_2,max}}{\omega_{CO_2}} - 1 \right) \cdot \frac{O_{PSmin}}{O_{VSmin}} \quad [-] \quad (3-21)$$

Pro zjednodušený výpočet přebytku vzduchu u tuhých paliv (pouze tuhá!):

$$\alpha = \frac{\omega_{CO_2,max}}{\omega_{CO_2}} \quad [-] \quad (3-22)$$

4 STANOVENÍ ÚČINNOSTI KOTLE

4.1 Přímé určení účinnosti

Účinnost parního kotle stanovená přímou metodou:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{výr}}{\dot{Q}_{pr}} = \frac{\dot{m}_v \cdot c_v \cdot \Delta t}{\dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r} = \frac{\dot{m}_p \cdot \Delta i}{\dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r} \quad [-] \quad (4-1)$$

kde $\dot{Q}_{výr}$.. teplo vyrobené (kW)

\dot{Q}_{pr} teplo do kotle přivedené (kW)

\dot{m}_v množství vody (kg · s⁻¹),

c_v měrná tepelná kapacita vody (kJ · kg⁻¹ · °C⁻¹),

Δt rozdíl teplot (°C),

\dot{m}_{pal} . množství paliva (kg · s⁻¹),

Q_i^r výhřevnost paliva (kJ · kg⁻¹),

\dot{m}_p množství páry (kg · s⁻¹),

Δi rozdíl entalpie vstupní vody a výstupní páry (kJ · kg⁻¹).

4.2 Nepřímé určení účinnosti

U nepřímého určení účinnosti jsou započítávány tepelné ztráty kotle. [5]

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{výr}}{\dot{Q}_{pr}} = \frac{\dot{Q}_{pr} - \dot{Q}_{zt}}{\dot{Q}_{pr}}$$

$$\eta = 1 - \sum_i \zeta_{Ci} = 1 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_{fi} - \zeta_{sv} - \zeta_{ch}, \quad [-] \quad (4-2)$$

kde \dot{Q}_{zt} tepelné ztráty kotle (kW)

ζ_{Ci} poměrné tepelné ztráty kotle:

ζ_{CO} ztráta hořlavinou ve spalínách, tj. chemická ztráta, čímž se myslí ztráta tepla nespálenými plynnými hořlavými složkami odváděnými z kotle ve spalínách v %,

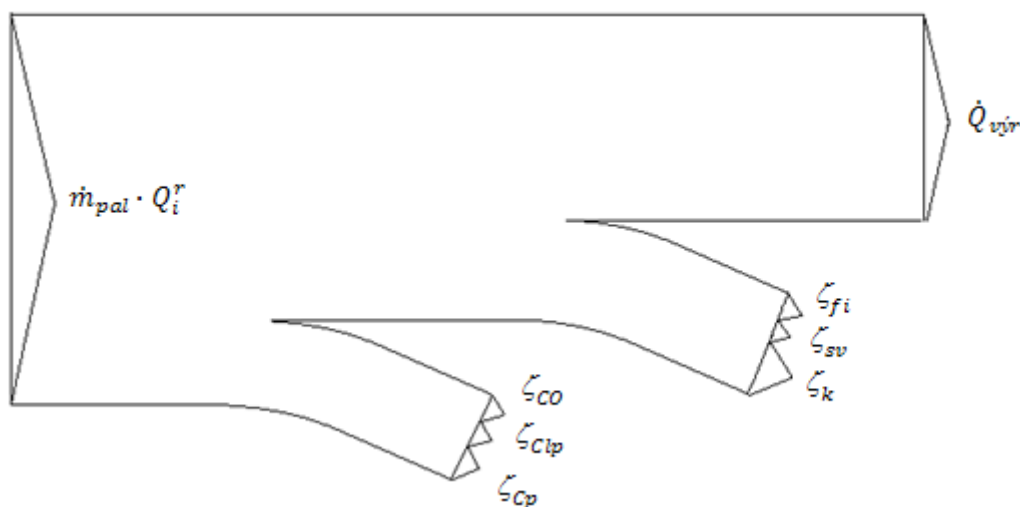
ζ_C ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích, tj. ztráta tepla nespálenou hořlavinou odváděnou z kotle v tuhých zbytcích spalování v %,

ζ_{fi} ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování, tj. fyzická, čímž se myslí ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků odváděných z kotle po spalování v %,

ζ_k ztráta citelným teplem spalin, tj. komínová, čímž se myslí ztráta tepla spalin odváděných z kotle za poslední teplosměnnou plochou [%]

ζ_{ch} ztráta teplem chladicí vody, což je ztráta chladicí vodou v %,

ζ_{sv} ztráta sdílením tepla do okolí, tj. sáláním, čímž se myslí ztráta tepla sdílením do okolí z vnějšího povrchu kotle v %.



Obr. 4-1 Sankeyův diagram

4.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:

a. Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích ζ_c při spalování tuhého paliva

$$\zeta_c = \sum_i \zeta_{ci} = \zeta_{cs} + \zeta_{cp} + \zeta_{cl} + \zeta_{cr} + \zeta_{cb}, \quad [\%] \quad (4-3)$$

kde ζ_{cs} je ztráta hořlavinou ve škváře nebo strusce, tj. v tuhých zbytcích zachycených v ohništi v %,

ζ_{cp} ztráta hořlavinou v popílku, tj. v tuhých zbytcích zachycených v průtazích kotle nebo odprašováku v %,

ζ_{cl} ztráta hořlavinou v úletu, tj. v tuhých zbytcích odcházejících z kotelního zařízení společně se spaliny v %,

ζ_{cr} ztráta hořlavinou v roštovém propadu (vyskytuje se pouze u roštových kotlů, pokud se propad při normálním provozu nevrací do ohniště) v %,

ζ_{cb} ztráta hořlavinou v uhelném prášku v brýdách (vyskytuje se pouze u práškových kotlů s otevřeným mlecím okruhem, pokud se brýdy neodvádějí společně se spaliny odcházejícími z kotle, potom je již ζ_{cb} zahrnuta ve ztrátě ζ_{cl} v %.

Ztráty ζ_{cs} , ζ_{cp} , ζ_{cl} , ζ_{cr} lze vyjádřit společným vzorcem

$$\zeta_{ci} = \frac{C_i}{100 - C_i} \cdot \frac{X_i}{100} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot Q_{i_{c_i}}, \quad [\%] \quad (4-4)$$

kde ζ_{ci} je ztráta hořlavinou v uvažovaném druhu tuhých zbytků ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$) v %,

C_i obsah hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$) v %,

X_i obsah popela v palivu zachyceného v uvažovaném druhu tuhých zbytků, vztažený k obsahu popela v palivu přivedeném do kotelního zařízení ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$) v %,

A^r obsah popela ve spalovaném palivu v %,

q_l teplo přivedené do kotle spálením jednoho kilogramu paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

$Q_{i_{c_i}}$ výhřevnost hořlaviny uvažovaného druhu tuhých zbytků ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$), pokud je hořlavinou uhlík: $Q_{i_{c_i}} = 32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

Při obsahu hořlaviny $C_i \geq 20 \%$ $Q_{i_{c_i}}$ se stanoví laboratorně v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

i uvažovaný druh tuhých zbytků,
s struska, škvára,
pop popílek,
l úlet,
lp ložový popel,
r propad.

$$q_l = Q_i^r + \Delta i_{pv} + x \cdot O_{vz} \cdot \Delta i_{vz}, \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-5)$$

kde Δi_{pv} ... přírůstek entalpie paliva po předeřtátí cizím zdrojem v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 x podíl vzduchu ohříváného cizím zdrojem z celkového množství spalovacího vzduchu,
 O_{vz} objem vzduchu při teplotě 0°C , tlaku 101, 325 kPa a dané vlhkosti, přivedeného do ohniště pro spálení jednoho kilogramu paliva v $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,
 Δi_{pv} rozdíl entalpie spalovacího vzduchu před ohřtátím a po ohřtátí cizím zdrojem (při teplotě 0°C , tlaku 101, 325 kPa a dané vlhkosti) v $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,
 Q_r^i výhřevnost paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

V případě, že se palivo i vzduch neohřívají cizím zdrojem, redukuje se rovnice na vztah

$$q_l = Q_i^r \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-6)$$

b. Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích při spalování kapalného paliva

$$\zeta_c = 0 \quad [-] \quad (4-7)$$

Ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích při spalování kapalných paliv se volí s ohledem na druh a vlastnosti kapalného paliva (zejména u nenormalizovaných kapalných paliv), na výkon kotle, provozní režim kotle a podle toho, pro jaké účely bude kotel používán.

c. Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích při spalování plynného paliva

$$\zeta_c = 0 \quad [-] \quad (4-8)$$

Při spalování plynných paliv se tato ztráta v žádném případě neuvažuje.

4.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách

Ztráta hořlavinou ve spalínách lze vypočítat podle rovnice

$$\zeta_{CO} = \frac{O_{ps} \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{iCO}^r}{\dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r} = \frac{100 - \zeta_C}{100} \cdot \frac{12\,610 \cdot \omega_{CO} + 10\,798 \cdot \omega_{H_2} + 35\,818 \cdot \omega_{CH_4}}{q_l} \cdot O_{ps} \quad [\%] \quad (4-9)$$

kde ζ_C ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích v %,

ω_{CO} obsah CO v plynných spalínách v %,

ω_{H_2} obsah H_2 v plynných spalínách v %,

ω_{CH_4} ... obsah CH_4 a vyšších uhlovodíků v plynných spalínách v %,

q_l teplo přivedené do kotle u tuhých a tekutých paliv s jedním kilogramem paliva ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), u plynných paliv s jedním m^3 plynného paliva při 0 °C, tlaku 101, 325 kPa a dané vlhkosti ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$),

O_{ps} objem suchých spalín při teplotě 0 °C a tlaku 101, 325 kPa vzniklých z 1 kg tuhého či kapalného paliva, resp. z 1 m^3 plynného paliva ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$),

Q_{iCO}^r výhřevnost spalín v $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,

\dot{m}_{pal} ... množství přiváděného paliva v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$,

Q_i^r výhřevnost paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

4.2.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování

$$\zeta_f = \sum_i \zeta_{fi} = \zeta_{fs} + \zeta_{fpop} + \zeta_{fl} + \zeta_{fr} + \zeta_{flp} \quad [\%] \quad (4-10)$$

Při spalování topného oleje nebo plynu se předpokládá, že ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků pro spalování je nulová.

a. Ztráta fyzickým teplem v uvažovaném druhu tuhých zbytků ζ_{fi} v % po spalování

$$\zeta_{fi} = \frac{X_i}{100 - C_i} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot c_i \cdot t_i \quad [\%] \quad (4-11)$$

kde C_i obsah hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků ($i = s, pop, l, lp, r$) v %,

X_i obsah popela v palivu zachyceného v uvažovaném druhu tuhých zbytků, vztažený k obsahu popela v palivu přivedeném do kotelního zařízení ($i = s, pop, l, lp, r$) v %,

A^r obsah popela ve spalovaném palivu v %,
 q_l teplo přivedené do kotle spálením jednoho kilogramu paliva
 v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 c_i střední měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků při teplotě t_i
 ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$) v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,
 t_i teplota tuhých zbytků ($i = s, \text{pop}, l, \text{lp}, r$) v $^\circ\text{C}$,
 i uvažovaný druh tuhých zbytků,
 s struska, škvára,
 pop popílek,
 l úlet,
 lp ložový popel,
 r propad.

Teplota tuhých zbytků t_i se určí přímým měřením nebo odhadem podle teploty v místě odběru. Měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků c_i lze stanovit podle rovnice

$$c_i = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_i \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-12)$$

přibližně lze však s vyhovující přesností použít

$$c_{\text{pop}} = c_i = c_r = 0,84 \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4-13)$$

$$c_s = 1,26 \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4-14)$$

- b. Pro přibližné vyjádření ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků ve strusce a úletu ζ_{fsl} v % po spalování lze použít vzorce ve tvaru

$$\zeta_{fsl} = \left(\frac{X_s}{100 - C_s} \cdot i_s + \frac{X_l}{100 - c_l} \cdot c_l \cdot t_l \right) \cdot \frac{A^r}{q_l} \quad [\%] \quad (4-15)$$

kde C_s obsah spalitelných látek ve strusce nebo škváře v %

X_s obsah popela v palivu zachyceného ve strusce nebo škváře, vztažený
 k obsahu popela v palivu přivedeném do kotelního zařízení
 v %,

A^r obsah popela ve spalovaném palivu v %,
 q_l teplo vzniklé v kotli spálením jednoho kilogramu paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 c_l měrné teplo v úletu ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$),
 t_l teplota úletu = teplota odcházejících spalín - t_k v $^\circ\text{C}$,
 i_s entalpie 1 kg strusky nebo škváry v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

C_l obsah spalitelných látek v úletu v %,

X_s obsah popela paliva v úletu, vztažený k obsahu popela v palivu
přivedeném do kotelního zařízení v %,

Poznámka:

$i_s = 1\,760 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ pro $t_s = 1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$ – včetně skupenského tepla) u výtavných ohnišť

$i_s = 560 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ pro $t_s = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ u granulačních a roštových ohnišť

$c_i = 0,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pro $t_1 = 100$ až $200 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2.4 Ztráta citelným teplem spalín

$$\zeta_k = (100 - \zeta_c) \cdot \frac{O_{pv} \cdot c_{pv} \cdot (t_k - t_{vz})}{q_l} \quad [\%] \quad (4-16)$$

kde ζ_c ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích v %,

O_{pv} objem vlhkých spalín vzniklých spálením 1 kg paliva pro stav
při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $101,325 \text{ kPa}$ v $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,

q_l teplo vzniklé v kotli spálením jednoho kilogramu paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

c_{pv} střední měrné teplo vlhkých spalín při teplotě t_k ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$),

t_k teplota spalín odcházejících z kotle v $^\circ\text{C}$,

t_{vz} teplota vzduchu vstupujícího do kotelního zařízení v $^\circ\text{C}$,

- a) Pro přibližné výpočty ztráty citelným teplem spalín ζ_k v % při spalování tuhých paliv je možné použít rovnici

$$\zeta_k = k \cdot (t_k - t_{vz}) \quad [\%] \quad (4-17)$$

kde ζ_k ztráta citelným teplem spalín v %,

t_k teplota spalín odcházejících z kotle v $^\circ\text{C}$,

t_{vz} teplota vzduchu vstupujícího do kotelního zařízení v $^\circ\text{C}$,

k součinitel, pro který platí:

$$k = \left(\frac{0,575}{\omega_{CO_2}} + 0,076 \right) \cdot \left(1 + \frac{2\,449,3 \cdot \frac{100 - A^r}{100}}{Q_i^r} \right) - 0,077 \quad [-] \quad (4-18)$$

kde ω_{CO_2} .. obsah CO_2 v plynných spalínách v %,

A^r obsah popela ve spalovaném palivu v %,

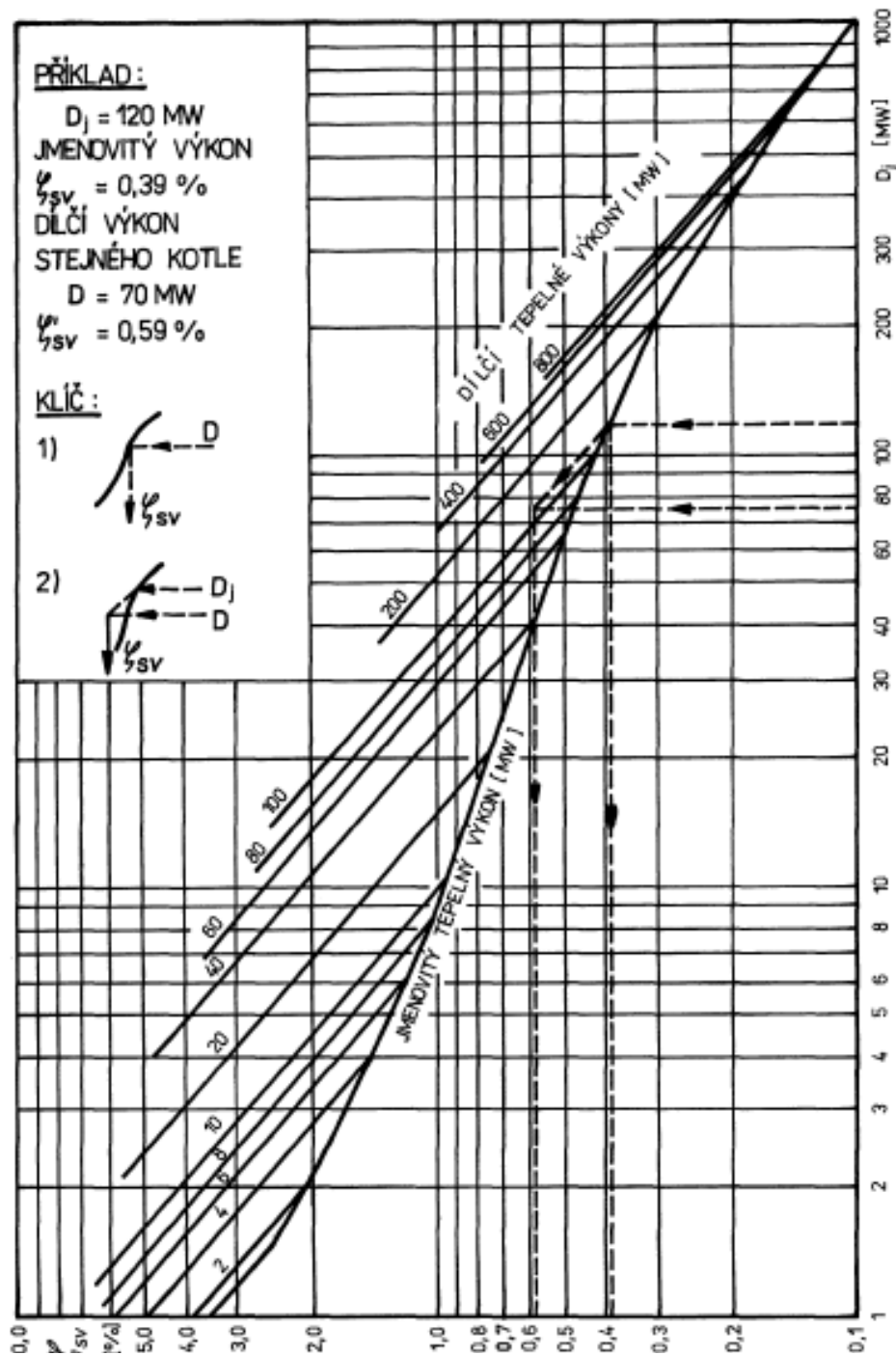
Q_i^r výhřevnost paliva v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4.2.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

Ztráta sdílením tepla do okolí ζ_{sv} je v tomto nomogramu vypracována v závislosti na výrobním teple při jmenovité i dílčím výkonu kotle.

kde D_j jmenovitý výkon kotle (MW),

D dílčí výkon kotle (MW).



Obr. 4-2 Nomogram pro stanovení ztráty sdílením tepla do okolí

5 ODSIŘOVÁNÍ SPALIN

Obsah SO_2 ve spalinách se může snižovat už při samotném spalování (přímé odsiřování) nebo až po odchodu spalin z parního kotle, za jeho poslední výhřevnou plochou (dodatečné odsiřování). [3]

Přímé odsiřování -dociluje se nejčastěji reakcí oxidu vápenatého se složkami spalin



CaO se přivádí do ohniště s palivem již připravený, nebo teprve při spalování vzniká. Přidává-li se do paliva uhličitán vápenatý (vápenec), probíhá napřed reakce:



přičemž vzroste obsah CO_2 ve spalinách.

Přidává-li se do paliva hydroxid vápenatý (hašené vápno), probíhá napřed reakce:



takže vzroste obsah H_2O ve spalinách.

Při reakci oxidu vápenatého se obsah SO_2 ve spalinách zmenší o část SO_2 vázanou na CaSO_4 ; toto zmenšení se vyjadřuje stupněm odsiřování n_s :

$$n_s = \frac{\text{část spalitelné síry z paliva převedená na síran}}{\text{spalitelná síra paliva}} \quad (5-5)$$

Zároveň se zvětší spotřeba kyslíku respektive vzduchu; tento vzduch však obsahuje určité množství CO_2 takže se zvětší obsah CO_2 ve spalinách a jejich celkový objem.

Aby se zajistilo pokud možno úplné odsiřování spalin, musí se do reakce přivádět nadbytek vápníku; tento nadbytek se vyjadřuje stechiometrickým poměrem vápníku n_{Ca}

$$n_{\text{Ca}} = \frac{\text{přivedený Ca}}{\text{stechiometricky potřebný Ca}} \quad (5-6)$$

V hmotnostní bilanci se pak musí uvažovat

- hmotnostní tok přídavné látky \dot{m}_{ad}
- zvětšení množství tuhých zbytků o vzniklý CaSO_4 a nevyužitý přebytek CaO

Stupeň odsíření n_s se může vypočítat z daného obsahu síry v palivu a ze změřeného obsahu (parciálního tlaku) SO_2 v suchých spalínách:

$$n_s = 1 - \frac{V_{ss} \cdot \omega_{SO_2}}{0,682 \cdot 65 \cdot S_{spal}} \quad (5-7)$$

6 VÝPOČET

Zadání:

Pro zadané parametry stanovte účinnost fluidního kotle nepřímou metodou, palivem je hnědé uhlí, hodnoty jsou zadané vedoucím bakalářské práce (viz Tab. 6-1):

Prvkový rozbor paliva:			
Q_i^r	15 700	[kJ·kg ⁻¹]	výhřevnost
C^r	37,97	[%hm]	obsah uhlíku v surovém vzorku paliva
H^r	4,53	[%hm]	obsah vodíku v surovém vzorku paliva
N^r	0,63	[%hm]	obsah dusíku v surovém vzorku paliva
O^r	9,87	[%hm]	obsah kyslíku v surovém vzorku paliva
S^r	1,02	[%hm]	obsah síry v surovém vzorku paliva
W^r	27,00	[%hm]	obsah vody v surovém vzorku paliva
A^r	18,98	[%hm]	obsah popeloviny v surovém vzorku paliva
Parametry při spalování			
\dot{m}_p	40	[t·h ⁻¹]	jmenovitý výkon kotle
p_p	6,3	[MPa]	jmenovitý tlak páry
t_p	465	[°C]	jmenovitá teplota páry
p_{nv}	6,65	[MPa]	tlak napájecí vody
t_{nv}	140	[°C]	teplota napájecí vody
t_{vz}	20	[°C]	Teplota nasávaného vzduchu, vzduch z okolí
t_{pop}	132,3	[°C]	teplota spalín na výstupu z kotle a teplota popílku
t_{lp}	850	[°C]	teplota ve fluidní vrstvě a teplota ložového popele
C_{lp}	2	[%]	nedopal v ložovém popelu
X_{lp}	70	[%]	záchyt ložového popela
C_{pop}	2	[%]	nedopal v popílku
X_{pop}	70	[%]	záchyt popílku
ω_{CO}	20	[ppm obj]	koncentrace CO ve spalínách
α	1,33	[-]	přebytek vzduchu

Tab. 6-1 Zadání pro výpočet účinnosti kotle

6.1 Stechiometrie spalování

Objem spalovacího vzduchu teoretického:

$$O_{O_2 min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r + \frac{22,39}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,39}{2 \cdot 2,016} \cdot H^r - \frac{22,39}{32} \cdot O^r$$

$$O_{O_2 min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,3797 + \frac{22,39}{32,066} \cdot 0,0102 + \frac{22,39}{2 \cdot 2,016} \cdot 0,0453 - \frac{22,39}{32} \cdot 0,0987$$

$$O_{O_2 min} = 0,90 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{VS min} = \frac{V_{O_2}}{0,2095} = \frac{0,90}{0,2095} = 4,30 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem spalín teoretických:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3797 = 0,70 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0102 = 0,01 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{N_2 min} = O_{N_2, vz} + O_{N_2, spal} = 0,7905 \cdot O_{VS min} + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r$$

$$O_{N_2 min} = 0,7905 \cdot 4,30 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0063 = 3,40 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{PS min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2, t} = 0,70 + 0,01 + 3,40 = 4,11 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem vzduchu skutečného:

Stanovení součinitele zvětšení objemu vzduchu vlivem vlhkosti

$$p_{vz} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$\varphi_{vz} = 0,316 \%$$

$$t_{vz} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\omega_{vz} = 0,00457 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}^{-3}, \text{ bylo určeno dle standartu AirH}_2\text{O v programu EES.}$$

$$\nu = 1 + \frac{\omega_{vz}}{0,622} = 1 + \frac{0,00457}{0,622} = 1,01$$

$$O_{VV} = O_{VS} \cdot \nu = 5,76 \cdot 1,01 = \mathbf{5,78 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem spalín skutečných:

$$O_{N_2,sk} = O_{N_2,vz} + O_{N_2,spal} = 0,7905 \cdot O_{VS} + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r$$

$$O_{N_2,sk} = 0,7905 \cdot 5,76 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0063$$

$$O_{N_2,sk} = \mathbf{4,56 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$O_{O_2} = 0,2095 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS \, min} = 0,2095 \cdot (1,33 - 1) \cdot 4,30 = \mathbf{0,30 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$O_{PS} = O_{PS \, min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VS \, min} = 4,11 + (1,33 - 1) \cdot 4,30$$

$$O_{PS} = \mathbf{5,53 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$O_{PV} = O_{PS} + O_{H_2O,sk} = 5,53 + 0,9 = \mathbf{6,43 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$O_{H_2O,sk} = \frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 2,016} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + \alpha \cdot (\nu - 1) \cdot O_{VS \, min}$$

$$O_{H_2O,sk} = \frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 2,016} \cdot 0,0453 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,27 + 1,33 \cdot (1,01 - 1) \cdot 4,30 = \mathbf{0,9 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Koncentrace složek ve spalínách:

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,70}{6,43} \cdot 100 = \mathbf{10,89\%}$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,01}{6,43} \cdot 100 = \mathbf{0,16\%}$$

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2,sk}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{4,56}{6,43} \cdot 100 = \mathbf{70,92\%}$$

$$\omega_{O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,3}{6,43} \cdot 100 = \mathbf{4,67\%}$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,9}{6,43} \cdot 100 = \mathbf{14,00\%}$$

$$\omega_C = \sum \omega_i = \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2,sk} + \omega_{O_2} + \omega_{H_2O}$$

$$\omega_C = 10,64 + 0,15 + 69,30 + 4,71 + 15,35 \cong 100\%$$

6.2 Měrná tepelná kapacita spalín

Provedeme interpolaci pro teplotu $t_{sp}=132,3^\circ\text{C}$ dle Tab. 6-2

Teplota	Střední měrné teplo při konstantním tlaku v $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$				
$^\circ\text{C}$	H_2O	N_2	O_2	CO_2	SO_2
100	1,499	1,306	1,319	1,725	1,863
200	1,520	1,310	1,336	1,817	1,943

Tab. 6-2 Střední měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku [5]

$$c_{p,CO_2,(132,3)} = \frac{c_{p,200} - c_{p,100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{132,3} - t_{100}) + c_{p,100}$$

$$c_{p,CO_2,(132,3)} = \frac{1,817 - 1,725}{200 - 100} \cdot (132,3 - 100) + 1,725 = \mathbf{1,755 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$c_{p,SO_2,(132,3)} = \frac{c_{p,200} - c_{p,100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{132,3} - t_{100}) + c_{p,100}$$

$$c_{p,SO_2,(132,3)} = \frac{1,943 - 1,863}{200 - 100} \cdot (132,3 - 100) + 1,863 = \mathbf{1,889 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$c_{p,N_2,(132,3)} = \frac{c_{p,200} - c_{p,100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{132,3} - t_{100}) + c_{p,100}$$

$$c_{p,N_2,(132,3)} = \frac{1,310 - 1,306}{200 - 100} \cdot (132,3 - 100) + 1,306 = \mathbf{1,307 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$c_{p,O_2,(132,3)} = \frac{c_{p,200} - c_{p,100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{132,3} - t_{100}) + c_{p,100}$$

$$c_{p,O_2,(132,3)} = \frac{1,336 - 1,319}{200 - 100} \cdot (132,3 - 100) + 1,319 = \mathbf{1,324 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$c_{p,H_2O,(132,3)} = \frac{c_{p,200} - c_{p,100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{132,3} - t_{100}) + c_{p,100}$$

$$c_{p,H_2O,(132,3)} = \frac{1,520 - 1,499}{200 - 100} \cdot (132,3 - 100) + 1,499 = \mathbf{1,506 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

koncentrace složek ve spalínách:

$$\omega_{CO_2} = 10,89\%, \omega_{SO_2} = 0,16\%, \omega_{N_2} = 70,92\%, \omega_{O_2} = 4,67\%, \omega_{H_2O} = 14,00\%$$

$$c_{p,sp} = c_{p,CO_2,(132,3)} \cdot \omega_{CO_2} + c_{p,SO_2,(132,3)} \cdot \omega_{SO_2} + c_{p,N_2,(132,3)} \cdot \omega_{N_2,sk} + c_{p,O_2,(132,3)} \cdot \omega_{O_2} \\ + c_{p,H_2O,(132,3)} \cdot \omega_{H_2O}$$

$$c_{p,sp} = 1,755 \cdot 0,1089 + 1,889 \cdot 0,0016 + 1,307 \cdot 0,7092 + 1,324 \cdot 0,0467 + 1,506 \cdot 0,14$$

$$c_{p,sp} = \mathbf{1,39 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

6.3 Výpočet účinnosti kotle bez odsíření

6.3.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:

$$\zeta_C = \sum_i \zeta_{Ci} = \zeta_{C_{pop}} + \zeta_{C_{lp}} = 0,241 + 0,563 = \mathbf{0,804 \%}$$

Ztráta hořlavinou v popílku:

$$\zeta_{c_{pop}} = \frac{c_{pop}}{100 - c_{pop}} \cdot \frac{x_{pop}}{100} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot Q_{i_{c_i}} = \frac{2}{100 - 2} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{18,98}{15\,700} \cdot 32\,600 = \mathbf{0,241\%}$$

Ztráta hořlavinou v ložovém popelu:

$$\zeta_{c_{lp}} = \frac{c_{lp}}{100 - c_{lp}} \cdot \frac{x_{lp}}{100} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot Q_{i_{c_i}} = \frac{2}{100 - 2} \cdot \frac{70}{100} \cdot \frac{18,98}{15\,700} \cdot 32\,600 = \mathbf{0,563\%}$$

6.3.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách

$$\zeta_{CO} = \frac{100 - \zeta_c}{100} \cdot \frac{12\,610 \cdot \omega_{CO} + 10\,798 \cdot \omega_{H_2} + 35\,818 \cdot \omega_{CH_4}}{q_l} \cdot O_{ps}$$

$$\zeta_{CO} = \frac{100 - 0,804}{100} \cdot \frac{12\,610 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{15\,700} \cdot 5,53 = \mathbf{0,009\%}$$

6.3.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování

$$\zeta_f = \sum_i \zeta_{fi} = \zeta_{f_{pop}} + \zeta_{f_{lp}} = 0,038 + 0,836 = \mathbf{0,874\%}$$

Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$\zeta_{f_{pop}} = \frac{x_{pop}}{100 - c_{pop}} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot c_{pop} \cdot t_{pop} = \frac{30}{100 - 2} \cdot \frac{18,98}{15\,700} \cdot 0,778 \cdot 132,3 = \mathbf{0,038\%}$$

Měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků c_i

$$c_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 132,3$$

$$c_{pop} = \mathbf{0,778\,kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}}$$

Ztráta fyzickým teplem v ložovém popelu

$$\zeta_{f_{lp}} = \frac{x_{lp}}{100 - c_{lp}} \cdot \frac{A^r}{q_l} \cdot c_{lp} \cdot t_{lp} = \frac{70}{100 - 2} \cdot \frac{18,98}{15\,700} \cdot 1,139 \cdot 850 = \mathbf{0,836\%}$$

Měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků c_i

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 850 = \mathbf{1,139 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

6.3.4 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)

$$\zeta_k = (100 - \zeta_c) \cdot \frac{O_{pv} \cdot c_{pv} \cdot (t_k - t_{vz})}{q_l} = (100 - 0,804) \cdot \frac{6,43 \cdot 1,39 \cdot (132,3 - 20)}{15\,700} = \mathbf{6,360 \%}$$

6.3.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

Entalpie vody a páry byly určeny dle standartu IAPWS v programu EES.

určení entalpie páry i_p pro teplotu $t_p = 365^\circ\text{C}$ a tlak $p_p = 6,3 \text{ MPa}$

$$i_p = 3331,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

určení entalpie napájecí vody i_{np} pro teplotu $t_{np} = 140^\circ\text{C}$ a tlak $p_{np} = 6,65 \text{ MPa}$

$$i_{nv} = 593,40 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

výpočet výkonu kotle

$$D = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_{nv}) = 40 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot (3335 - 593,3) = 30\,463,3 \text{ kW} = \mathbf{30,5 \text{ MW}}$$

Ztrátu sdílením do okolí určíme z Obr. 4-2, jelikož se jedná o graf v logaritmickém měřítku, musíme si vypočítat základ logaritmu a :

$$\log_a 40 - \log_a 1 = 87$$

$$\log_a 40 = 87$$

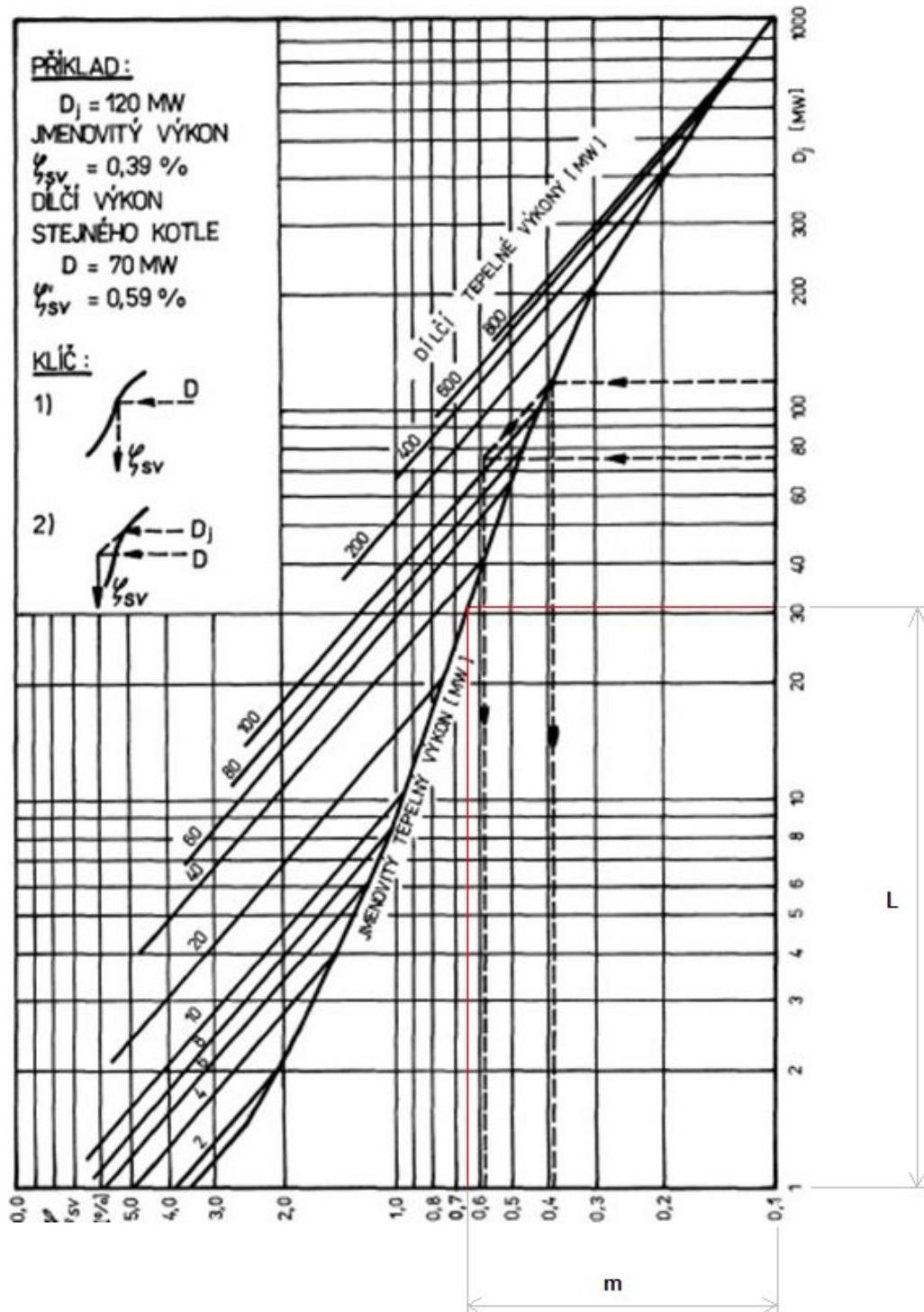
$$40 = a^{87}$$

$$a = \sqrt[87]{40} = 1,043$$

Následně vypočítáme vzdálenost L od počátku, pro $D = 30,5 \text{ MW}$:

$$D = \exp(L \cdot \ln 1,043 + \ln 1) \Rightarrow L = 80,58 \text{ mm}$$

Tuto vzdálenost nanese na svislou osu grafu a tímto bodem vedeme rovnoběžku s vodorovnou osou. V průsečíku rovnoběžky s křivkou grafu sestrojíme kolmici na vodorovnou osu (viz Obr. 6-1).



Obr. 6-1 Postup při určení ztráty sdílením tepla do okolí

určení základu logaritmu a

$$\log_a 10 - \log_a 0,1 = 129$$

$$\log_a 100 = 129$$

$$100 = a^{129}$$

$$a = \sqrt[129]{100} = 1,036$$

výpočet ztráty sdílením do okolí ζ_{sv} , přičemž $m = 52$ mm:

$$\zeta_{sv} = \exp(m \cdot \ln 1,036 + \ln 0,1) = \exp(52 \cdot \ln 1,036 + \ln 0,1) = \mathbf{0,64\%}$$

6.3.6 Stanovení účinnosti fluidního kotle

$$\eta = 100 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_{fi} - \zeta_{sv}$$

$$\eta = 100 - (0,009 + 0,804 + 6,360 + 0,874 + 0,64)$$

$$\eta = \mathbf{91,31\%}$$

6.4 Výpočet účinnosti kotle s odsiřením

Dle zadaných hodnot proveďte výpočet účinnosti fluidního kotle s odsiřením. Hodnoty jsou zadané vedoucím bakalářské práce (viz Tab. 6-3):

Zadané hodnoty pro výpočet odsiření			
n_{Ca}	2	[mol·mol ⁻¹]	Molární poměr Ca:S
n_S	65	[%]	Účinnost odsiření
\dot{m}_{ad}	613	[kg·h ⁻¹]	Přiváděné množství vápence

Tab. 6-3 Hodnoty zadané pro výpočet účinnosti kotle s odsiřením

Výpočet objemu vzduchu a spalin

U přímého odsiřování spalin se změní objem spalovacího vzduchu i objem a složení spalin. [3]

$$O_{VS} = 5,72 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}, S = 1,02 \, \%$$

$$O_{VS,K} = O_{VS} + 1,66779 \cdot S \cdot n_s = 5,72 + 1,66779 \cdot 0,0102 \cdot 0,65 = \mathbf{5,73 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Při odsiřování pomocí CaCO₃ bude:

$$O_{PS} = 5,53 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{PS,K} = O_{ps} + (0,63694 \cdot n_s + 0,69435 \cdot n_{Ca}) = 5,53 + (0,63694 \cdot 0,65 + 0,69435 \cdot 2)$$

$$O_{PS,K} = 7,33 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1},$$

přičemž se O_{H_2O} nemění.

$$O_{H_2O} = 0,9 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{PV,K} = O_{PS,K} + O_{H_2O} = 7,33 + 0,9 = 8,23 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem CO_2

$$O_{CO_2} = 0,7 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}, S = 1,02 \%, n_s = 65 \%, n_{Ca} = 2 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$O_{CO_2K} = O_{CO_2} + S \cdot (0,00055 \cdot n_s + 0,69431 \cdot n_{Ca})$$

$$O_{CO_2K} = 0,7 + 0,0102 \cdot (0,00055 \cdot 0,65 + 0,69431 \cdot 2) = 0,71 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Změny objemu a složení spalín se musí respektovat zvláště při výpočtu komínové ztráty.

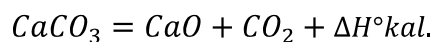
Energetická bilance

Slučovací tepla		
$\Delta H^\circ \text{CO}_2$	393,6	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$\Delta H^\circ \text{SO}_2$	296,8	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$\Delta H^\circ \text{CaCO}_3$	1212,1	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$\Delta H^\circ \text{CaO}$	635,1	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$\Delta H^\circ \text{CaSO}_4$	1433,7	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$

Tab. 6-4 Hodnoty zadané pro výpočet reakčního tepla

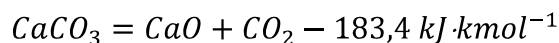
Do fluidního kotle je dávkován vápenec CaCO_3 a probíhá kalcinace, při které dochází k rozkladu CaCO_3 na oxid vápenatý CaO a na oxid uhličitý CO_2 .

Reakce je endotermní, tzn., že teplo je nutné dodávat:

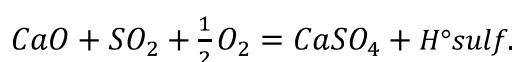


$$H^\circ kal. = \Delta H^\circ CaO + \Delta H^\circ CO_2 - \Delta H^\circ CaCO_3 = 635,1 + 393,6 - 1212,1$$

$$H^\circ kal. = -183,4 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$$



Následně dochází k odsíření, tzv. sulfataci. Oxid vápenatý CaO reaguje s oxidem siřičitým SO₂ a s kyslíkem O₂ a vzniká síran vápenatý CaSO₄. Tím dochází ke snížení množství SO₂ ve spalínách. Při této reakci teplo získáváme-exotermní reakce:



$$H^\circ sulf. = \Delta H^\circ CaSO_4 - (\Delta H^\circ SO_2 + \Delta H^\circ CaO) = 1433,7 - (296,8 + 635,1)$$

$$H^\circ sulf. = 501,8 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$$



Těmito reakcemi se změní zdánlivě výhřevnost paliva při odsířování pomocí CaCO₃:

$$Q_{Ca} = 5\,583 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, n_s = 65 \%, n_{Ca} = 2 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta Q_i^r = S \cdot (15\,652 \cdot n_s - Q_{Ca} \cdot n_{Ca}) = 0,0102 \cdot (15\,562 \cdot 0,65 - 5\,583 \cdot 2)$$

$$\Delta Q_i^r = -10,72 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Q_i^r = 15\,700 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

O hodnotu ΔQ_i^r se musí zvětšit také hodnota Q_i při výpočtu účinnosti a ztrát

$$q_{l,K} = Q_i^r + \Delta Q_i^r = 15\,700 - 10,72 = 15\,689 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní bilance

Do ohniště se spolu s tokem paliva \dot{m}_{pal} přivádí tok aditivní odsiřovací látky \dot{m}_{ad}

$$\mu_{ad} = \frac{\dot{m}_{ad}}{\dot{m}_{pal}} = S \cdot n_{Ca} \cdot k_s = 0,0102 \cdot 2 \cdot 3,1219 = 0,064$$

při odsiřování pomocí $CaCO_3$: $k_s = 3,1219$

Množství tuhých zbytků po spalování se zvětší o reakci vzniklý $CaSO_4$ a nezreagovaný přebytek CaO , v popelové bilanci se proto musí uvažovat nejen původní minerální složka A^r , ale také

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot S \cdot (n_{Ca} - n_s) = 1,7492 \cdot 0,0102 \cdot (2 - 0,65) \cdot 100 = \mathbf{2,4 \%}$$

6.4.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:

$$\zeta_{C,K} = \sum_i \zeta_{Ci} = \zeta_{C_{pK}} + \zeta_{C_{lpK}} = 0,271 + 0,635 = \mathbf{0,906 \%}$$

Ztráta hořlavinou v popílku:

Přidáním aditivní látky dojde ke změně popelové bilance a výhřevnosti (zvětší se množství popela a zmenší se výhřevnost)

$$\zeta_{C_{pK}} = \frac{C_{pop}}{100 - C_{pop}} \cdot \frac{X_{pop}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{i_{Ci}} = \frac{2}{100 - 2} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{18,98 + 2,4}{15\,689} \cdot 32\,600 = \mathbf{0,271 \%}$$

Ztráta hořlavinou v ložovém popelu:

$$\zeta_{C_{lpK}} = \frac{C_{lp}}{100 - C_{lp}} \cdot \frac{X_{lp}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{i_{Ci}} = \frac{2}{100 - 2} \cdot \frac{70}{100} \cdot \frac{18,98 + 2,4}{15\,689} \cdot 32\,600 = \mathbf{0,635 \%}$$

6.4.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - \zeta_{C,K}}{100} \cdot \frac{12\,610 \cdot \omega_{CO} + 10\,798 \cdot \omega_{H_2} + 35\,818 \cdot \omega_{CH_4}}{q_{l,K}} \cdot O_{PS,K}$$

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - 0,906}{100} \cdot \frac{12\,610 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{15\,689} \cdot 7,33 = \mathbf{0,012 \%}$$

6.4.3 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování

$$\zeta_{f,K} = \sum_i \zeta_{fi} = \zeta_{fpopK} + \zeta_{flpK} = 0,043 + 0,942 = \mathbf{0,985 \%}$$

Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$\zeta_{fpopK} = \frac{X_{pop}}{100 - c_{pop}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot c_{pop} \cdot t_{pop} = \frac{30}{100 - 2} \cdot \frac{18,98 + 2,4}{15\,689} \cdot 0,778 \cdot 132,3 = \mathbf{0,043 \%}$$

Měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků c_i

$$c_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 132,3$$

$$c_{pop} = \mathbf{0,778 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

Ztráta fyzickým teplem v ložovém popelu

$$\zeta_{flp} = \frac{X_{lp}}{100 - c_{lp}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot c_{lp} \cdot t_{lp} = \frac{70}{100 - 2} \cdot \frac{18,98 + 2,4}{15\,689} \cdot 1,139 \cdot 850 = \mathbf{0,942 \%}$$

Měrné teplo uvažovaného druhu tuhých zbytků c_i

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 850 = \mathbf{1,139 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

6.4.4 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)

Při odsíření dojde ke změně objemu vzduchu a spalín, a tím i ke změně složení spalín. Změnou složení spalín se změní také měrná tepelná kapacita spalín.

$$\omega_{CO_2K} = \frac{O_{CO_2K}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,71}{8,23} \cdot 100 = \mathbf{8,63\%}$$

$$\omega_{SO_2K} = \frac{O_{SO_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,01}{8,23} \cdot 100 = \mathbf{0,12\%}$$

$$\omega_{N_2K} = \frac{O_{N_2,sk}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{4,56}{8,23} \cdot 100 = \mathbf{55,41\%}$$

$$\omega_{O_2K} = \frac{O_{O_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,3}{8,23} \cdot 100 = \mathbf{3,65\%}$$

$$\omega_{H_2O,K} = \frac{O_{H_2O}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,9}{8,23} \cdot 100 = \mathbf{10,94\%}$$

$$c_{pvK} = c_{p,CO_2,(132,3)} \cdot \omega_{CO_2K} + c_{p,SO_2,(132,3)} \cdot \omega_{SO_2K} + c_{p,N_2,(132,3)} \cdot \omega_{N_2,sk,K} +$$

$$+ c_{p,O_2,(132,3)} \cdot \omega_{O_2K} + c_{p,H_2O,(132,3)} \cdot \omega_{H_2O,K}$$

$$c_{pvK} = 1,755 \cdot 0,0863 + 1,889 \cdot 0,0012 + 1,307 \cdot 0,5541 + 1,324 \cdot 0,0365 +$$

$$+ 1,506 \cdot 0,1094$$

$$c_{pvK} = \mathbf{1,091 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$\zeta_{kK} = (100 - \zeta_c) \cdot \frac{O_{pvK} \cdot c_{pvK} \cdot (t_k - t_{vz})}{q_{l,K}}$$

$$\zeta_{kK} = (100 - 0,906) \cdot \frac{8,23 \cdot 1,091 \cdot (132,3 - 20)}{15\,689} = \mathbf{6,369 \%}$$

6.4.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

Odsiřování na tuto ztrátu nemá vliv

$$\zeta_{sv} = \mathbf{0,64 \%}$$

6.4.6 Stanovení účinnosti roštového kotle

$$\eta = 100 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_{fi} - \zeta_{sv}$$

$$\eta = 100 - (0,012 + 0,906 + 6,369 + 0,985 + 0,64)$$

$$\eta = \mathbf{91,09 \%}$$

7 Porovnání výsledků s normou ČSN 07 0302

Vypočtené hodnoty pro stanovení účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou dle normy ČSN 07 0305 byly následně porovnány s výsledky výpočtu dle ČSN 07 0302, kdy byly zadány stejné parametry spalování. [6]

Norma	ČSN 07 0305	ČSN 07 0302
Způsob výpočtu	Bez odsíření	
Jednotky	%	
Ztráta hořlavinou v popílku	0,241	0,804
Ztráta hořlavinou v ložovém popelu	0,563	
Ztráta hořlavinou ve spalínách	0,009	0,009
Ztráta fyzickým teplem popílku	0,038	0,848
Ztráta fyzickým teplem ložového popela	0,836	
Ztráta citelným teplem spalin	6,360	6,973
Ztráta sdílením tepla do okolí	0,64	0,979
Účinnost	91,31	90,607

Tab. 7-1 Srovnání výpočtu účinnosti kotle bez odsíření

Norma	ČSN 07 0305	ČSN 07 0302
Způsob výpočtu	S odsířením	
Jednotky	%	
Ztráta hořlavinou v popílku	0,271	0,804
Ztráta hořlavinou v ložovém popelu	0,635	
Ztráta hořlavinou ve spalínách	0,012	0,009
Ztráta fyzickým teplem popílku	0,043	0,956
Ztráta fyzickým teplem ložového popela	0,942	
Ztráta citelným teplem spalin	6,369	6,978
Ztráta sdílením tepla do okolí	0,64	0,979
Účinnost	91,09	90,492

Tab. 7-2 Srovnání výpočtu účinnosti kotle s odsířením

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stručné shrnutí problematiky výpočtu účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou dle ČSN 07 0305. Vysvětluje rozdíl mezi přímou a nepřímou metodou stanovení účinnosti, uvádí vztahy pro určení jednotlivých tepelných ztrát kotle a zaměřuje se také na možnost použití aditivního odsíření.

Úvodní část práce se věnuje popisu fluidního kotle a způsobu spalování, které v něm probíhá. Následně je popsán zákon zachování energie, sestavení energetické bilance kotle a položky, které tuto bilanci tvoří.

Následující část se zabývá teoretickým rozbořem normy ČSN 07 0305. Nejdříve jsou uvedeny vztahy pro stechiometrii spalování, které nejsou v normě obsaženy, ale bývají nezbytné pro výpočet dílčích ztrát, konkrétně ztráty hořlavinou ve spalínách a ztráty citelným teplem spalín. Poté jsou popsány jednotlivé ztráty a vztahy pro jejich výpočet. Na účinnost kotle má vliv i odsíření spalín, se kterým tato norma vzhledem k době svého vzniku nepočítá. Vztahy pro výpočet aditivního odsíření byly převzaty z normy ČSN 07 0302.

Na závěr jsou provedeny výpočty pro hodnoty zadané vedoucím bakalářské práce. Stechiometrie spalování a účinnost fluidního kotle se vypočítá dle *Tab. 6-1 Zadání pro výpočet účinnosti kotle*, měrná tepelná kapacita dle *Tab. 6-2 Střední měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku* a aditivní odsíření dle *Tab. 6-3 Hodnoty zadané pro výpočet účinnosti kotle s odsířením*. Ke konci jsou srovnány výsledky s výpočtem dle ČSN 07 0302.

Účinnost fluidního kotle bez odsíření dle ČSN 07 0305 je 91,31% a dle ČSN 07 0302 je tato hodnota nižší - 90,607%. Při odsíření dojde ke změně objemu vzduchu a spalín, koncentrace složek ve spalínách, měrné tepelné kapacity spalín. Zvýší se také množství popela a sníží se výhřevnost. Následkem těchto změn dojde ke zvýšení tepelných ztrát kotle a ke snížení emisí, především oxidů síry. Účinnost fluidního kotle s odsířením je nižší – 91,09%, ale je to cena za ochranu životního prostředí.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michal Stáňa PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě: 21. 5. 2012

Handwritten signature of Kereš Pavel in blue ink, written over a dotted line.

(podpis autora)

9 Seznam použitých pramenů

- [1] http://cs.wikipedia.org/wiki/Fluidní_kotel - Fluidní kotel
- [2] http://sse-najizdarne.cz/fotogalerie/vyroba_el_en/fl_kot.jpg
Obr. 1-1 Schéma fluidního kotle s cirkulační vrstvou
- [3] ČSN 07 0302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: Český normalizační institut, 1996
- [4] Ševelová, K. a spol. *Parní kotle (Návody do cvičení)*. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2007
- [5] ČSN 07 0305. *Hodnocení kotlových ztrát*. Praha: Český normalizační institut, 1983
- [6] Klimčík, J. *Výpočet účinnosti fluidního parního kotle nepřímou metodou dle ČSN 07 0302* : bakalářská práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 52 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

10 Seznam příloh

Příloha č. 1: Výpočet účinnosti fluidního kotle v programu EES (počet stran: 7)